

特集1：最新医療における放射線の役割

超高磁場 MR 装置を用いた画像診断技術

久保 均

徳島大学医学部診療放射線技術学講座

(平成18年11月6日受付)

(平成18年11月14日受理)

はじめに

胸部 X 線単純撮影や X 線 CT 検査を始めとしたさまざまな医用画像技術を用いた画像診断は、日常臨床にとって欠くことができず非常に重要な地位を占めているのは周知の事実である。従来の X 線を用いた画像では解剖学的な構造を表現する形態的な画像診断が主であったが、 γ 線を用いる核医学検査や放射線を用いない磁気共鳴 (MR) 検査などでは機能的な画像診断も可能となってきた。その中でも MR 検査は形態情報と機能情報を同時に得ることができ、その有用性もますます大きくなってきている。

MR 装置において磁場強度とは、例えば車でいうエンジンの馬力に例えることが可能である。本邦では長い間 1.5 テスラという磁場強度が最大値であったが、平成 15 年 2 月に頭部用として初めて 3 テスラの MR 装置の承認があり、平成 17 年 1 月に全身用として適用が広がった。これらは米国 FDA の承認よりほぼ 4 年遅れたが、ようやく本邦でも超高磁場 MR 装置が臨床で使用可能となった訳である。車では馬力が増すと力強く走行することが可能となるのと同様、MR でも画質の向上が期待される。しかし、馬力が増すとその分シャーシ構造やブレーキ、あるいは運転法までも最適化しなければならないのと同様、MR 装置でも様々な問題が生じてくる。本稿では超高磁場 MR 装置を用いた新たな画像診断技術を概説し、我々の経験も加味した上でその将来性に言及したい。

MR 検査

MR 検査とは、被験者 (患者) を非常に強い磁場の中

に入れた上で特定の電波を照射することにより磁気共鳴現象を生じさせ、その結果被験者より出てくる非常に微弱な電波を受信して信号処理することにより画像化されるものである (図 1)^{1,2)}。この画像は X 線 CT と同様に断層像であるが、X 線 CT 像に比して特に軟部組織のコントラスト分解能に優れ、被曝が皆無である利点を有している²⁾。現在臨床で用いられているものは¹H 原子核 (プロトン) の磁気共鳴現象を観測するため、結果的に生体内の水分子の量や振る舞いを観測していることとなる。

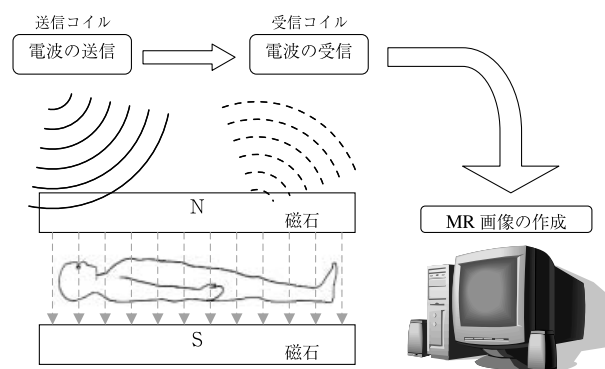


図 1 MR 画像撮影概念図。強力な磁場の中に被験者を入れ、特定の周波数の電波を照射することにより磁気共鳴現象を生じさせ、結果として発生する非常に微弱な電波を受けて画像化する。

磁場を増加させると - その利点と欠点 -

この MR に欠かせないものの一つに“磁場”がある。磁場は磁気共鳴現象を生じるために必須のものであり、最も重要な条件の一つである。この磁場の強さ“磁場強度”を変化させると、生体に対する様々な効果が変化する。これを表 1 に表す。磁場強度を増す最も大きな理由は、信号強度の向上である (図 2)。これは磁場強度に

表 1 磁場強度上昇による各種現象の効果とその利点・欠点

現象	効果	利点	欠点
信号強度		S/N	-
磁化率効果		fMRI	磁化率アーチファクトの増大
ケミカルシフト		MRS (周波数分解能)	-
T 1 値		MRA, 造影 (Gd)	T1コントラストの減少
T 2 * 値		DSC-MRIの感度上昇	ESPの短縮
SAR		-	FSE, MT パルス等 TR 延長, スライス数減少
磁気吸引力		-	事故

比例するため、従来の1.5テスラに比して2倍の信号強度を得ることが可能となる。次に大きな理由は、周波数分解能の向上である。これはMR Spectroscopy (MRS) といった分光分析手法を用いた代謝物等の化学物質の同定及び定量に威力を発揮する³⁾。また、磁化率効果も大きくなる。この効果の増大は欠点にも利点にもなりうるものであり、超高速撮像法である Echo planar imaging (EPI)などを用いる場合はゆがみの増大となるが、T2*強調画像を撮像することにより出血等の新たな情報を得ることが可能となる⁴⁾。あるいは緩和時間（特にT1値）の変化（延長）によりT1コントラストの減少がみられるが、MR angiography (MRA)では末梢血管の描出能が向上することとなる（図3）。このように磁場強度の

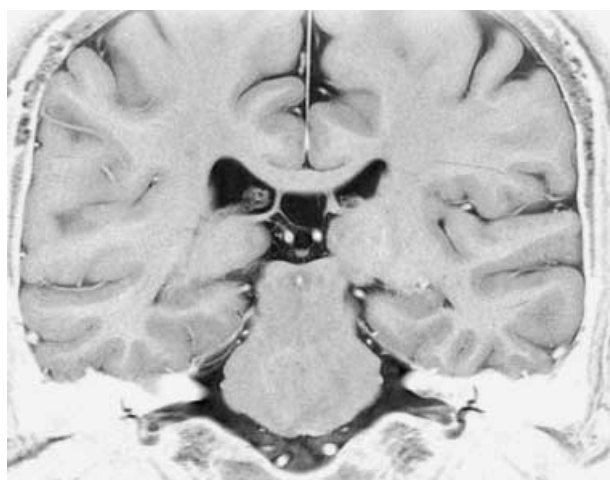


図 2(A)

信号強度増加による SNR 向上の例。(A)は3T,(B)は1.5Tによる同一ボランティアの頭部 MR 像。1.5T に比して3TのSNRが向上していることがわかる。

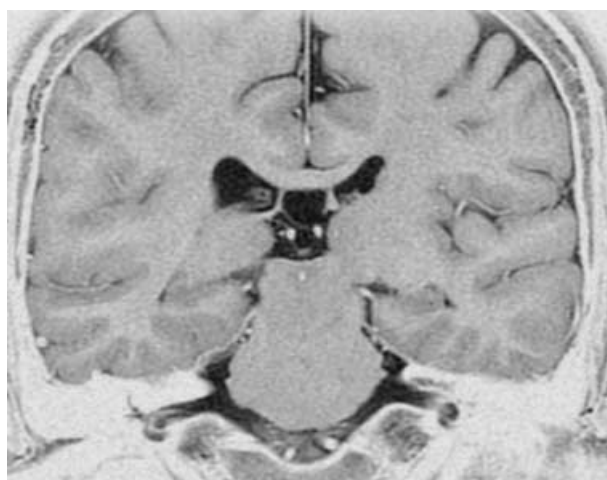


図 2(B)



図 3(A)

緩和時間の変化による MRA 描出能向上の例。(A)は3T,(B)は1.5Tによる同一ボランティアの頭部 MRA 像。1.5T に比して3Tの末梢血管描出能が向上していることがわかる。



図 3(B)

増大はさまざまな利点・欠点になりうるものであり、われわれは欠点を押さえつつ利点を最大限活かした画像診断技術を開発し運用しなければならない。

超高磁場を活かした画像診断

このような高磁場による利点を活かした画像診断手法として、以下のものがあげられる；1) 検査時間の短縮，2) 高空間分解能化，3) 高精度化および4) 新たなコントラストなどを用いた新たな情報の描出。これら⁵⁾について概説する。

1) 検査時間の短縮

1.5Tより3Tに磁場強度を上げることにより、信号強度が増加する。そのために、測定時間を同じとすれば信号雑音比(SNR)が2倍となるが、仮にSNRは同じでよいとすると測定時間の短縮(1/2)が可能となる。これらの考えを、検査目的に応じて使い分ければ良い。当院では脳卒中センターがあるためにMR検査は24時間対応であるが、この脳卒中用プロトコルでは時間短縮を優先させている(表2)。そのため、例えば15分以内の検査を目指すとして1.5Tでは出血の検出までしかできないが、3Tではそれに加えて錐体路の確認と頸部血管の確認ができることとなる。すると、図4のように錐体路の描出能より機能予後の情報を捉える可能性が出てくることとなる。ただし、tPA適応可否の判断のようにとにかく時間が勝負の場合はより短時間で検査を行っている。

2) 高空間分解能化

SNRの増大は高空間分解能化を可能とする。これにより、今まで描出できなかったような非常に詳細な臓器や組織の構造を表すことができるため、より患者に非侵襲的に検査が可能となる。

表2 当院における脳卒中用プロトコルの一例。

検査手法	目的	1.5T	3T
DWI	梗塞巣の検出	40s	40s
FAIR(PWI)	血液灌流の確認	3 m50s	3 m20s
頭部 MRA	血管の確認	6 m35s	3 m28s
T2*-WI	出血の検出	2 m45s	1 m35s
DTI	錐体路の確認	5 m00s	1 m10s
頸部 MRA	血管の確認	4 m58s	3 m47s
Total		23m28s	14m10s

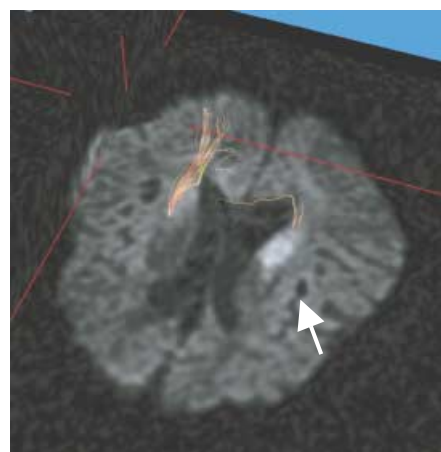


図4(A)

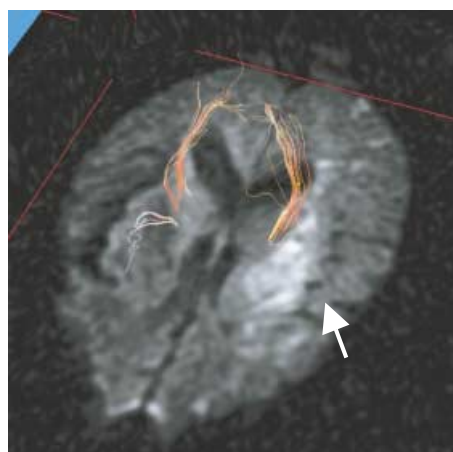


図4(B)

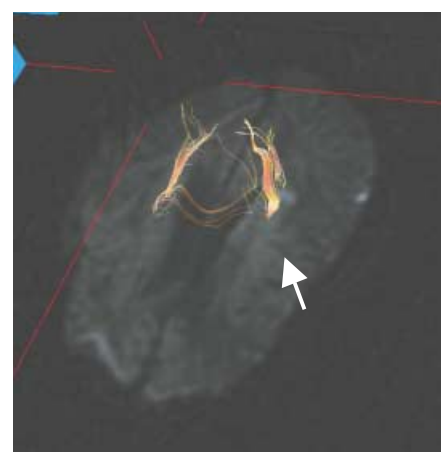


図4(C)

錐体路の描出能と機能予後の関連性示す例。(A)は梗塞巣によりトラクトが途絶している例で、予後不良を示唆する。(B)は梗塞巣をトラクトが迂回している例で、予後良好を示唆する。(C)は梗塞巣をトラクトが貫通している例であり、機能低下を示唆する。

3) 高精度化

より高いSNRとより高い空間分解能を用いると、今までに表現できない新たな情報の提供が可能となる。たとえば機能的 MR 検査手法である functional MRI (fMRI) と拡散強調検査手法を用いた diffusion tensor imaging (DTI) を組み合わせると、今までに画像化できなかった新たな情報を画像化することが可能となる。図 5 A) は両手・両足の賦活部位を fMRI にて同定したものであるが、その賦活部位に向かう神経線維の描出を DTI に行うと図 5 B) のようにそれぞれの領域に向かう神経線維の描出が可能となる。これも高磁場化によって可能

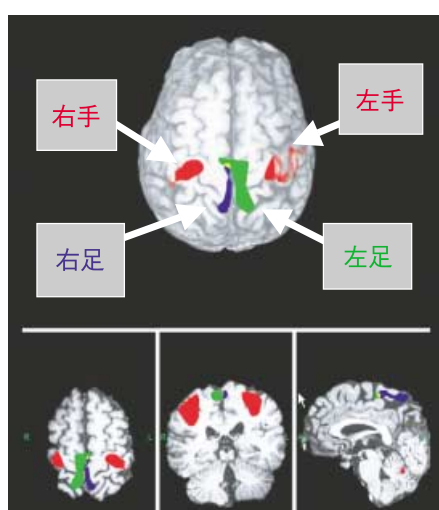


図 5(A)

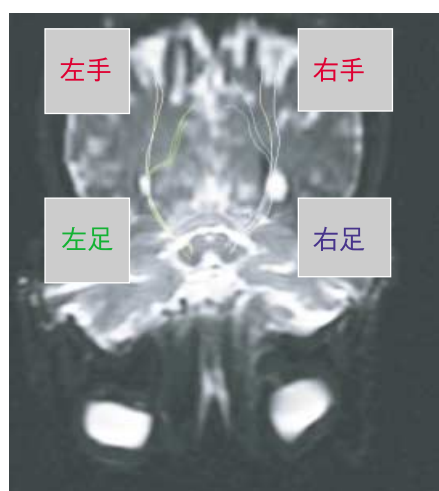


図 5(B)

両手、両足の賦活部位およびそれらへの神経繊維の描出例。(A) は両手および両足の賦活部位を健常ボランティアにて測定した例であり、非常に明確に分離が可能であった。(B) はそれぞれの賦活部位への神経繊維を描出したものであり、今までにない画像の創出が可能であった。

となった一例といえよう。また、従来はプロトンを対象核としていたが、他の核種もより高い信号をもって測定可能となった。従来からも ^{31}P や ^{19}F 、 ^{13}C などが試みられてきたが、感度を上げることができず実用化には至っていなかった。われわれの施設では、新たに ^{13}C が測定可能な設備を導入し、超高磁場 MR 装置を用いた ^{13}C -MRS の臨床応用を試みた。Natural abundanceの ^{13}C を測定する手法により副腎白質変性症 (ALD) の症例を検査したところ、年齢群を一致させた健常例に比して飽和長鎖脂肪酸の増加を捉えることが可能であった⁶⁾。これは ALD によるものと考えられ、臨床的に有用であった一例である。

MR 検査の将来

このような ^{13}C の利用は従来 PET が担ってきた生理的な代謝の状態を測定することが可能となる。加えて、PET で用いられている ^{18}F -FDG は細胞内で利用されず代謝されない、あるいは集積分布のみの評価が可能で代謝速度の評価は不可なのに対し、例えば ^{13}C -Glc を用いた MRS では細胞内で代謝され他の代謝物に変化することより、集積分布のみならず代謝速度の評価が可能となると考えられている。これらより ^{13}C -MRS は感度の低い欠点を解決できれば PET を凌駕する有用性も期待できるものである。

磁場強度は MR 装置にとって非常に重要であるが、臨床での使いやすさもあって 0.2~0.4 T 程度の低磁場装置と 1.5 T 以上の高磁場装置の 2 極化が進んでいる。しかし、研究用となると 3 T はもはや“中”磁場であり、7 T や 9 T が主流となってきている。そして、このような高い磁場強度を背景に従来の形態情報から機能情報、そして代謝情報へと測定対象がよりミクロ化してきている。この先に見えているのは分子イメージングの世界であり、MR は有力なモダリティの一つとして注目されている。今後は、形態情報はより高分解能に、機能情報はより高機能に、そして代謝情報はより多角的に測定可能となり臨床に貢献していくと考えられる。また、研究においては分子レベルのイメージングを通じてさまざまな生体機能の解明に寄与するものと思われる。

おわりに

本稿では最近の MR 検査に関する知見を述べた。今後ますますの性能向上が図られることにより新たな可能性が生まれると思われるが、新たに安全性の面での検討も必要となってきた。われわれ医療技術者は新しい可能性を開きながら、元来持っている非侵襲的という MR 検査の最も重要な部分を確実に維持していくことが肝要である。

文 献

1. (社)日本放射線技術学会放射線撮影分科会 (編集 土井 司): 放射線医療技術学叢書(18) MR 撮像技術. 日本放射線技術学会, 東京 2000 pp 6 11
2. 高橋正治, 川上壽昭, 杜下淳次, 笠井俊文 他: 図解 診療放射線技術実践ガイド. 文光堂, 東京, 2002 pp 49 72 pp 77 83
3. 原田雅史, 久保 均, 湊 雅子, 古谷かおり 他: 脳 MRS の最近の潮流 - 静磁場上昇の恩恵を受けて -. Radiology Frontier 8(4): 11 16 2005
4. 原田雅史, 久保 均, 森田奈緒美, 湊 雅子 他: 頭部の出血病変検出率向上が 3 T MRI の臨床的利点. 新医療 378: 64 66 2006
5. 原田雅史, 久保 均, 高尾章一郎, 森田奈緒美 他: 領域別 3 T MRI の臨床的有用性 - 1.5 T MRI とどこが違うのか? 1. 頭部における有用性. INNER-VISION 21(9): 6 10 2006
6. 原田雅史, 久保 均, 西谷 弘, 松田 豪: 脳内 natural abundant ^{13}C 代謝物の 3 T MR 装置による検討. 第22回 ^{13}C 医学応用研究会, 第9回日本呼吸病態生化学研究会合同学術大会2006プログラム・講演抄録集, 16 2006

New diagnostic imaging technology using ultra high-fields Magnetic Resonance apparatus

Hitoshi Kubo

Department of Radiologic Technology, School of Health Sciences, The University of Tokushima, Tokushima, Japan

SUMMARY

Diagnostic imaging plays an essential role in the clinical scene in Japan. Especially, magnetic resonance (MR) is widely accepted as indispensable apparatus for daily clinical activities and researches as both morphological imaging and functional imaging. Considerable numbers of 1.5 T MR imagers have already been installed and their efficacy and clinical evidences are well established in Japanese medical institutes. On the other hand, highly expected 3T MR equipments, which have been introduced to US/EU regions and some Asian countries, are not yet widely accepted in medical exercises in Japan.

The 3T MR apparatus provide almost as double quality on the signal to noise ratio (SNR) as 1.5 T, it also has advantages on image quality improvement and measurement time. Besides these classical methods, new functional information may be added to morphological information. However, strong susceptibility and any other effects of ultra high field may cause not only advantages but also disadvantages, respectively. We should develop and practice diagnostic imaging technology to make the best use of advantages and reduce of disadvantages caused by ultra high field. The future of ultra high field MR may be advanced to molecular imaging and may be beyond the PET-CT technique.

Key words : ultra high field MR apparatus, diagnostic imaging technology, functional imaging, molecular imaging